УДК 614.895.5 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-30-38

Исследование стабильности полимерных композитов на основе эпоксидной матрицы и астраленов при воздействии повышенных температур

В. А. Борисова, А. А. Егоров
Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы МЧС России (г. Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Введение. Рассмотрен один из способов совершенствования эксплуатационных характеристик изделий на основе полимерных композитов с эпоксидной матрицей за счет улучшения показателей их термостойкости и прочности путем введения модификаторов.
Постановка задачи. Задачей данного исследования является сравнение показателей термостойкости эпоксидных материалов гомогенного исполнения с составами, улучшенными посредством наполнения углеродными наноструктурами.
Теоретическая часть. В качестве базовой информации проведен выбор модифицирующих материалов, подбор оптимального состава связующего на основе эпоксидной смолы, низкомолекулярного отвердителя, пластификатора и наполнителя; отработана технология введения модификаторов в структуру эпоксидной матрицы. С помощью термогравиметрических и дифференциально-термических исследований проведен анализ изменения температур начала и конца термического эффекта, температуры максимального термического эффекта, амплитудного значения и ширины пика эффекта, индекса его формы, потерь массы нагреваемых образцов в зависимости от их рецептуры.
Выводы. Результаты исследования свидетельствуют о возможности использования эпоксидных смол, наполненных порошкообразными наноструктурами углерода, в различных сферах производства в связи с положительным влиянием аддитивов на показатели термической устойчивости.

Ключевые слова: эпоксидная смола, полимерный композитный материал, термический анализ, углеродные наноструктуры, астрален, пожарная безопасность, термическая стабильность.

Для цитирования: Борисова, В. А. Исследование стабильности полимерных композитов на основе эпоксидной матрицы и астраленов при воздействии повышенных температур / В. А. Борисова, А. А. Егоров // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020. — № 4. — С. 30 −38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-30-38

Investigation of the stability of polymer composites based on epoxy matrix and astralenes under exposure to high temperatures

V. A. Borisova, A. A. Egorov
Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (Saint Petersburg, Russian Federation)

Introduction. The paper considers one of the ways to improve performance characteristics of products based on polymer composites with epoxy matrix by improving their thermal stability and durability by introducing modifiers.
Problem Statement. The objective of this study is to compare the heat resistance indicators of epoxy matrices of classical design with compositions improved by modification with carbon nanostructures.
Theoretical Part. For basic information, the selection of modifying materials, the selection of the optimal composition of the binder based on epoxy resin, low-molecular hardener, plasticizer and filler was carried out. The technology of introducing modifiers into the structure of the epoxy matrix was developed. Thermogravimetric and differential thermal studies were used to analyze changes in the temperature of the beginning and the end of the thermal effect, the temperature of the maximum thermal effect, the amplitude value and width of the peak effect, the index of its shape, and the mass loss of heated samples depending on their formulation.
Conclusion. The results of the study indicate the possibility of using epoxy resins filled with powdered carbon nanostructures in various areas of production due to the positive effect of additives on thermal stability indicators.

Keywords**:** epoxy resin, polymer composite material, thermal analysis, carbon nanostructures, astralen, fire safety, thermal stability.

For citation**:** Borisova V. A., Egorov A. A. Investigation of the stability of polymer composites based on epoxy matrix and astralenes under exposure to high temperatures: Safety of Technogenic and Natural Systems. 2020;4:30–38. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-4-30-38

Введение. В современных условиях композиционные материалы (композиты) считаются одними из самых перспективных и наиболее востребованных. Своему широкому распространению они во многом обязаны

способности прогнозировать требуемые свойства еще на стадии разработки за счет модификации состава и технологии изготовления изделий. Отдельную нишу композитов занимают полимерные композитные материалы (ПКМ). В их структуре в качестве не менее одной непрерывной фазы используется органический полимер. Это может быть, например, полиэфирная, эпоксидная или кремнийорганическая смола [1].

В состав конструкционных ПКМ входит матрица (полимерное связующее) и один или несколько армирующих наполнителей, придающих материалу высокую прочность. Компоненты композита подобраны таким образом, чтобы не происходило их взаимное растворение или поглощение. Благодаря заданной адгезионной связи матрицы и наполнителя обеспечиваются некоторые существенные качества ПКМ, в т. ч. монолитность. Изменять адгезионные свойства можно за счет выбора и модификации состава матрицы.

Одними из самых распространенных связующих являются эпоксидные. Основой эпоксидной матрицы служит эпоксидная смола (ЭС). Эпоксидную матрицу композита получают путем введения в смолу функциональных присадок: отвердителей, загустителей и др. ЭС — это жидкая и вязкая или твердая прозрачная термопластичная структура, имеющая оттенок от светлого до темно-коричневого. Отвержденные эпоксидные полимеры являются достаточно хрупкими матрицами с низкой огнестойкостью, поэтому широкое распространение получили различные методы их модификации. При добавлении в эпоксидные смолы отвердителей образуются термореактивные материалы, которые обладают высокой адгезией и когезией; хорошими диэлектрическими свойствами; повышенной механической прочностью, а также стойкостью к воздействию воды и многих химических соединений [2]. Однако существенными недостатками, ограничивающими использование таких однофазных материалов, являются низкие показатели термической стойкости и стабильности при воздействии повышенных температур [3].

Для повышения термической стабильности предложено армирование эпоксидной матрицы астраленами (Astr), представляющими собой углеродные наноструктуры. Проанализированы рецептура модифицированного состава и способ комплексного введения в ЭС низкомолекулярного отвердителя и наночастиц.

За счет связывания молекул компонентов эпоксидных матриц с углеродными наноструктурами и благодаря их антиокислительным свойствам наблюдается повышение прочностных характеристик и термической стойкости материалов. Это, в свою очередь, приводит к увеличению энергии, требующейся для разрушения структурированного образца, что позволяет замедлить деструкционные процессы в матрице. Получение экспериментального подтверждения повышения термической стойкости ПКМ путем введения Astr позволит сделать выводы о возможности использования этого наполнителя в качестве наномодификатора на практике.

Постановка задачи. Задачей данного исследования является сравнение показателей термостойкости эпоксидных матриц с составами, улучшенными посредством модификации углеродными наноструктурами. При этом необходимо оценить возможность использования эпоксидных смол в различных сферах производства в связи с положительным влиянием аддитивов на показатели термической стойкости. Следует провести выбор модифицирующих материалов, а также оптимального состава связующего на основе эпоксидной смолы, при этом необходима отработка технологии введения модификаторов в структуру матрицы. По данным результатам должен быть проведен анализ нескольких критериев, выявленных в ходе исследования.

Теоретическая часть. Объектами исследования стали характеристики термостойкости образцов связующего, состоящего из эпоксидной смолы ЭД-20 [4], отвердителя — триэтилентетрамина (ТЭТА) [5] и пластификатора — диглицидилового эфира диэтиленгликоля ДЭГ-1 [6], а также образцов ПКМ на базе указанного связующего и порошкообразных наноразмерных наполнителей — астраленов. Согласно [7] астралены представляют собой полиэдральные структуры из атомов углерода в виде многослойных тороподобных частиц размерами 15–150 нм. Преимущества инновационных аддитивов Astr по сравнению с наночастицами других элементов связаны с высокими характеристиками проводимости, термостойкости, стабильности и прочности [8].

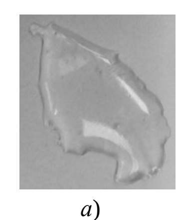
Массовая концентрация компонентов материала должна быть тщательно подобрана с учетом рекомендаций [9], так как в противном случае могут снижаться эксплуатационные характеристики, а также наблюдаться миграции молекул на поверхность отвержденного образца. Подобранные на основе рекомендаций рецептуры материалов приведены в табл. 1. Дальнейшая подготовка образцов модифицированного материала осуществлялась в несколько этапов. Известно [10], что обеспечить качество вводимых наполнителей в объем матрицы возможно за счет их диспергирования в низкомолекулярном отвердителе с помощью ультразвуковой ванны с последующим добавлением смолы.

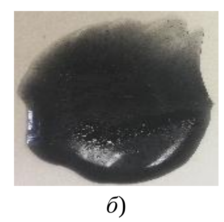
Таблица 1

Рецептура исследуемых материалов

Ингредиенты	Содержание по массе, %					
Эпоксидная смола ЭД-20	90	90	90	85	85	85
Отвердитель ТЭТА	10	9	8	10	9	8
Пластификатор ДЭГ-1	–	–	–	5	5	5
Наполнитель Astr	–	1	2	–	1	2

На первом этапе создания модифицированных образцов проводилась подготовка суспензий на основе отвердителя с добавлением углеродных наноструктур и последующим их диспергированием при температуре 20,0±0,2 ºС и нормальном атмосферном давлении под воздействием источника ультразвука мощностью 1 кВт с частотой 60 кГц в течение 10 мин. Параллельно подготавливались однородные суспензии эпоксидной смолы с пластификатором для получения пластифицированных образцов. Далее модифицированные растворы отвердителя добавляли в объем предварительно взвешенной смолы для получения составов с концентрациями элементов, соответствующими табл. 1. После этого смеси в течение 5 мин. перемешивались до однородного состояния. На следующем этапе проводилось отверждение составов при комнатной температуре. Полученные образцы исследуемых материалов представлены на рис. 1.


а)


б)


в)


г)


д)


е)

Рис. 1. Фотографии образцов с рецептурами, указанными в табл. 1:
а — без пластификатора и Astr; б — без пластификатора и с содержанием 1 % Astr; в — без пластификатора и с содержанием 2 % Astr; г — с пластификатором и без Astr; д — с содержанием пластификатора и 1 % Astr; е — с содержанием пластификатора и 2 % Astr

Чтобы оценить поведение исследуемых материалов в условиях термического воздействия, определены их показатели термического эффекта на установке «Termoscan-2». Использован метод термического анализа [11], основанный на изучении свойств веществ и происходящих в них процессов при изменении температуры. При этом традиционно используются два варианта этого анализа — термогравиметрический (ТГА) и дифференциально-термический (ДТА).

Сущность дифференциально-термического анализа заключается в регистрации тепловых эффектов, сопровождающих физические превращения и химические реакции под воздействием высоких температур [12]. Метод основан на изменении фундаментальных особенностей вещества, связанных с их химическим составом и кристаллической структурой.

Анализ процесса нагревания исследуемого материала на термограммах дифференциально-термического анализа, называемых ДТГ-кривыми (рис. 1, 2), указывает на присутствие нескольких пиков, соответствующих термическому эффекту (ТЭ) компонентов материалов с рецептурой, соответствующей табл. 1. Все образцы имеют два характерных пика, указывающих на интенсивное окисление с последующей диссоциацией триэтилентетрамина — первый (низкотемпературный) пик и эпихлоргидрина — второй (высокотемпературный) пик.

Основными показателями ТЭ при дифференциально-термическом анализе служат:

— температура начала — температура, при которой начинается интенсивное окисление вещества;

— температура максимума — температура, при которой происходит самовоспламенение, и процесс окисления сменяется процессами диссоциации — химическим и физическим разложением окисленного компонента;

— температура конца — температура окончания процесса диссоциации компонента;

— амплитудное значение — изменение (дельта) температуры от начала ТЭ до достижения его максимального значения;

— ширина пика — температурный интервал, на протяжении которого наблюдался ТЭ;

— индекс формы — описывает отношение продолжительности процессов диссоциации и окисления.

В таблице 2 приведены значения показателей, описывающих процессы выгорания компонентов исследуемых образцов без пластификатора.

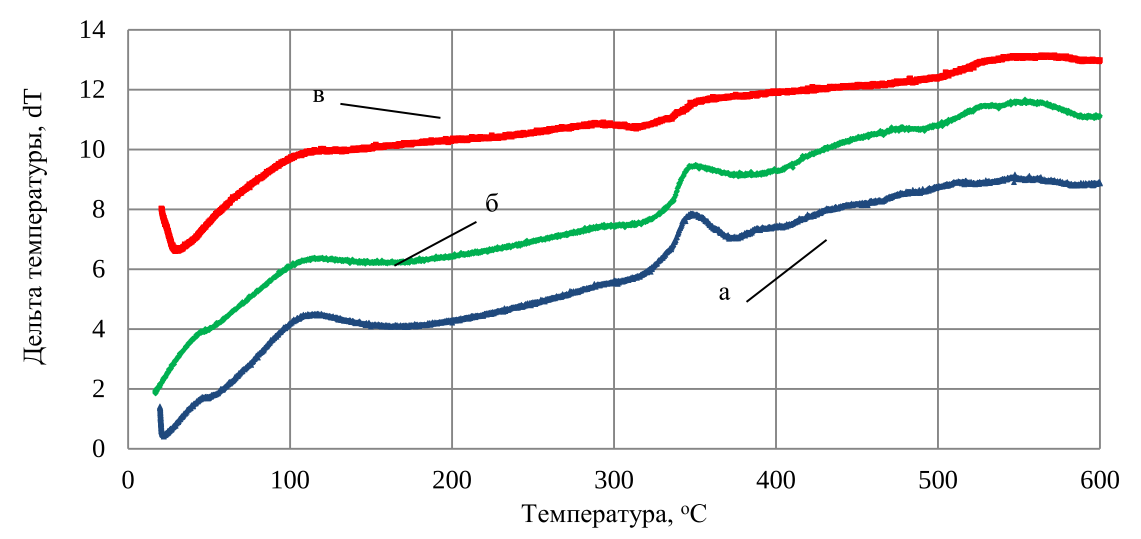


Рис. 2. Дифференциально-термические кривые материалов без пластификатора:
а — без Astr; б — с содержанием 1 % Astr; в — с содержанием 2 % Astr

Таблица 2

Параметры дифференциально-термических кривых материалов без пластификатора[1]

Температурные показатели, °С, и индекс формы ТЭ	Значения параметров для рецептур материалов					
	без Astr		с содержанием 1 % Astr		с содержанием 2 % Astr	
	Пик 1	Пик 2	Пик 1	Пик 2	Пик 1	Пик 2
Температура начала	51	315	48	313	не наблюдается	317
Температура максимума	115	351	118	353		562
Температура конца	170	375	151	377		*
Амплитудное значение	2,78	2,2	2,37	1,88		2,33
Ширина пика	119	60	103	64		>317
Индекс формы	0,86	0,67	0,47	0,6		-

[1]Примечание — до 600 °С прекращения экзотермических реакций не наблюдается

Сравнение показателей термического анализа материалов без пластификатора позволяет сделать следующие выводы:

1. Для образца с наполнителем Astr в концентрации 2 % при нагревании не наблюдается 1-го пика ТЭ, указывающего на интенсивное разрушение компонентов отвердителя. Начало пика другого компонента начинается при температуре, аналогичной температуре начала ТЭ образца без наполнителей, однако температура воспламенения сдвигается примерно на 200 °С, и при дальнейшем нагревании образца до 600 °С прекращения экзотермических реакций не наблюдается.

2. Скорость окисления модифицированного образца ниже, чем скорость улетучивания продуктов термического разложения, что говорит о повышении термической устойчивости материала за счет увеличения времени окисления от начала до его перехода в процесс самовоспламенения.

3. Амплитудное значение ТЭ материала с добавлением 1 % Astr ниже аналогичного значения для образца без наполнителя (контрольного образца), что говорит о снижении интенсивности экзотермических реакций, а также является подтверждением повышения термической стабильности модифицированного состава по сравнению с немодифицированным.

4. Присутствие на термограмме ярких пиков с пологим отклонением нисходящей ветви указывает на возникающие в структуре эффектов разрушения кристаллической решетки, что, однако, не наблюдается для образца с содержанием 2 % Astr.

Несколько иначе ведут себя материалы с добавлением пластификатора (рис. 3). Результаты этих исследований представлены на рис. 3 и в таблице 3.

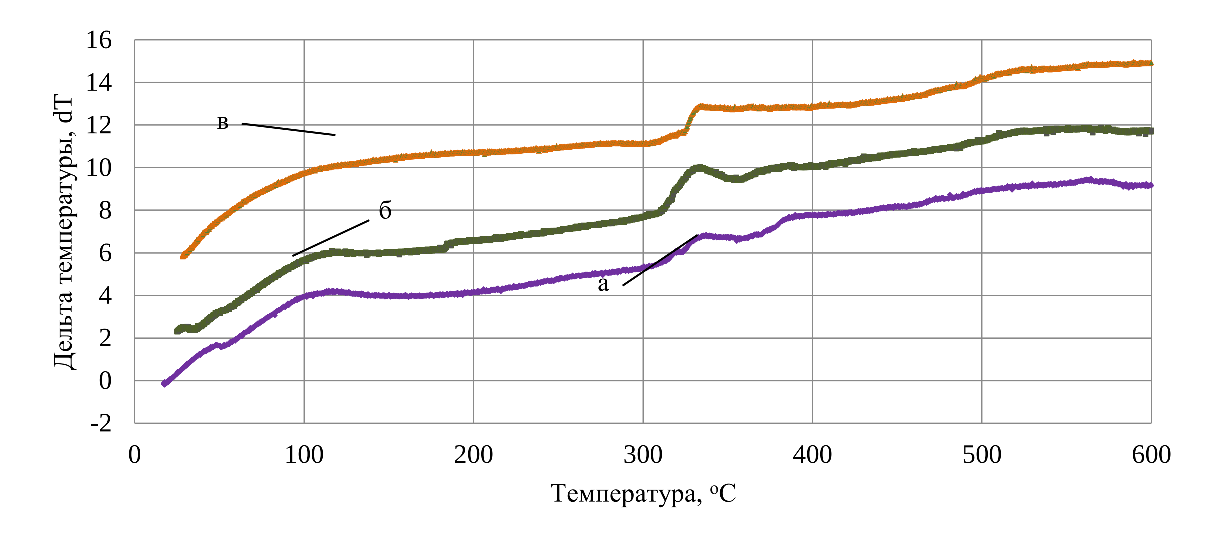


Рис. 3. Дифференциально-термические кривые материалов с содержанием пластификатора: а — без Astr; б — с содержанием 1 % Astr; в — с содержанием 2 % Astr

Таблица 3

Параметры дифференциально-термических кривых материалов с содержанием пластификатора

<table>
<tr><th rowspan="3">Температурные показатели, °C, и индекс формы ТЭ</th><th colspan="6">Значения параметров для рецептур материалов</th></tr>
<tr><th colspan="2">без Astr</th><th colspan="2">с содержанием 1 % Astr</th><th colspan="2">с содержанием 2 % Astr</th></tr>
<tr><th>Пик 1</th><th>Пик 2</th><th>Пик 1</th><th>Пик 2</th><th>Пик 1</th><th>Пик 2</th></tr>
<tr><td>Температура начала</td><td>50</td><td>305</td><td>56</td><td>311</td><td rowspan="6">Не наблюдается</td><td rowspan="6">*</td></tr>
<tr><td>Температура максимума</td><td>111</td><td>336</td><td>116</td><td>334</td></tr>
<tr><td>Температура конца</td><td>136</td><td>355</td><td>138</td><td>357</td></tr>
<tr><td>Амплитудное значение</td><td>2,48</td><td>1,41</td><td>2,73</td><td>2,08</td></tr>
<tr><td>Ширина пика</td><td>86</td><td>50</td><td>82</td><td>46</td></tr>
<tr><td>Индекс формы</td><td>0,41</td><td>0,61</td><td>0,37</td><td>1,00</td></tr>
</table>

* — наблюдается лишь начало термического эффекта при 321 °C с незначительным перегибом при достижении температуры 332 °C.

При сравнении результатов анализа контрольного образца и образца с добавлением пластификатора наблюдается снижение всех 6 показателей ДТА, что говорит о повышении воспламеняемости, увеличении скорости окисления и выгорания материала, и, как следствие, о снижении стабильности горения при внесении в состав смолы пластификатора на основе диглицидилового эфира диэтиленгликоля. Данное явление обусловлено, в первую очередь, разбавлением эпихлоргидрина, температура самовоспламенения которого превышает 400 °C, более горючим диэтиленгликолем с температурой самовоспламенения 210 °C [13]. Решить данную проблему возможно при помощи использования пластифицирующих соединений с более высокими теплозащитными свойствами [14]. Сравнение показателей ДТА материалов с пластификатором позволяет сделать следующие выводы:

1. Для образца пластифицированного материала с содержанием 2 % Astr пика ТЭ не наблюдается, как и в случае с непластифицированным материалом.

2. Наблюдается существенный сдвиг и сглаживание второго характеристического пика ТЭ. Так, для него наблюдается лишь начало термического эффекта при 321 °C с незначительным перегибом при достижении температуры 332 °C. Температура максимального проявления ТЭ, равно как и температура его окончания, наблюдается при нагреве выше 600 °C. Такая пологая форма и растянутость экзотермических эффектов характерна для медленно протекающих процессов окисления, т. е. формирования коксового слоя с последующим выгоранием и улетучиванием кокса.

3. Существенных изменений в лучшую сторону, влияющих на показатели горючести материала с пластификатором при добавлении 1 % Astr, зафиксировано не было.

Полученные в ходе ДТА данные говорят о существенном улучшении показателей термической стабильности эпоксидной смолы, в структуру которой депонированы наночастицы Astr с содержанием 2 % масс. Наблюдается данный эффект благодаря антиокислительным свойствам модификаторов, которые тормозят деструктивные процессы окисления за счет увеличения энергии, требующейся для разрушения структурированного наномодификаторами образца.

Исследование термолиза образцов методом термогравиметрического анализа. Термогравиметрический (термовесовой) анализ основан на получении и изучении закономерностей изменения веса вещества в процессе нагревания [15]. Термогравиметрическая (ТГ) кривая показывает изменение абсолютной или относительной массы вещества от начала и до конца нагрева. Она также носит название нормальной или интегральной термовесовой кривой.

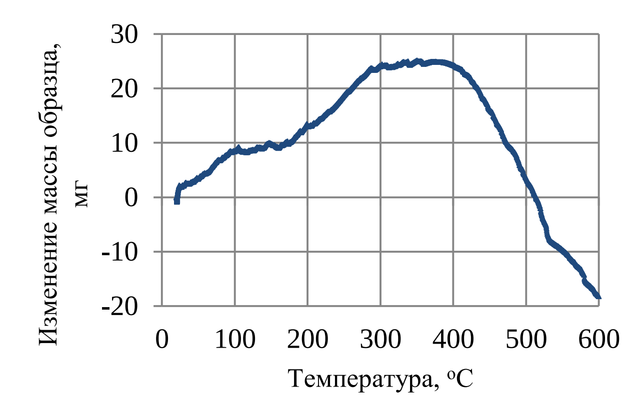
Происходящие в веществе при нагревании процессы подлежат наиболее полной интерпретации лишь в сочетании данных ТГА и ДТА посредством получения соответствующих кривых. Так, например, физико-химические реакции диссоциации и дегидратации, такие как испарение влаги, улетучивание углекислого газа и других летучих компонентов сопровождаются потерей массы. Обратный процесс — возрастание массы, он обусловлен окислением и формированием на поверхности изделий карбонизированного углистого слоя. За время нагревания в образце может происходить целый ряд переходов окисления и карбонизации в реакции диссоциации. Также на ТГ-кривых могут присутствовать несколько пиков, которые указывают на деструкцию влаги, содержащейся в образце, поверхностного жирового слоя, неполимеризовавшихся молекул и иных примесей в материале.

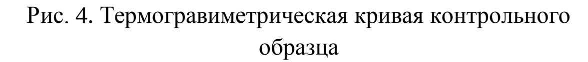
Основными характеристиками ТГ-кривой являются температура начала разложения и температура окончания реакции, соответствующая максимальному изменению массы. Ярко выраженные пики ТГ-кривых означают ускорение процессов термического разложения, и, как следствие, увеличение темпов потери массы. На практике можно проследить взаимосвязь ТГ-кривых и ДТГ-кривых в связи с тем, что сильные ТЭ приводят к ускоренному нарастанию углистого слоя с дальнейшим интенсивным его разложением (рис. 4–9).

При анализе процесса потери массы образцов рассматриваемых материалов наблюдается следующее:

1. Имеет место постепенное окисление материала контрольного образца при нагревании вплоть до 375 °C, однако при достижении этой температуры, равной температуре конца ТЭ, наступает непрерывная деструкция образца.

2. Потеря массы пластифицированного образца без добавления наполнителей имеет несколько отличий. Во-первых, кривая имеет более равномерный вид, что говорит о стабильной ритмичности процессов изменения массы. Во-вторых, при 180 °C наблюдается переход от нарастания массы к ее улетучиванию. На ДТГ-кривых при этой температуре отмечается плавное возрастание ТЭ. Незначительная потеря массы в ходе этого процесса, наблюдаемая на ТГ-кривой, позволяет судить об улетучивании выгоревшего поверхностного слоя, которое сопровождается снижением теплоизолирующей способности поверхности образца, подвергающейся деструкции. Окончание термического разложения материала наблюдается при 355 °C, что коррелирует с температурой конца ТЭ, полученной при анализе ДТГ-кривой.




Рис. 4. Термогравиметрическая кривая контрольного образца

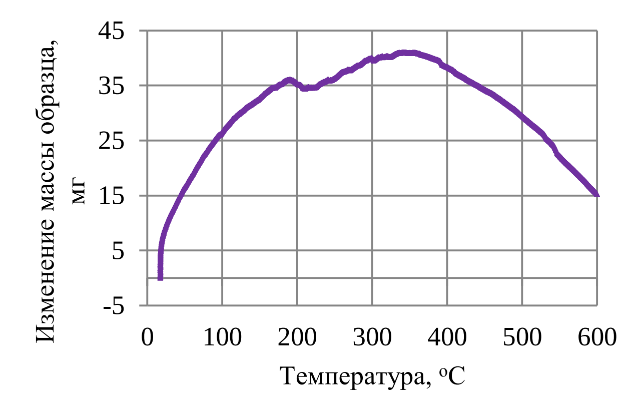


Рис. 5. Термогравиметрическая кривая образца без Astr и с содержанием пластификатора

3. Для нанонаполненного образца с 1 % Astr первый переход от прироста массы к ее потере наблюдается при 237 °С, однако в интервале температур 289–332 °С изменение массы образца не наблюдается, либо является незначительным. При достижении 332 °С начинается процесс деструкции материала. Тем ни менее, сопоставляя кривые ТГ и ДТГ, можно заметить, что потеря массы образца начинается до наступления максимального ТЭ. Это связано также с потерей теплоизолирующего слоя за счет улетучиванием соединений, подвергшихся окислению при нагревании.

4. Прирост массы нанонаполненного пластифицированного образца с содержанием 1 % Astr происходит при нагреве свыше 50 °С вплоть до температуры 600 °С. В остальном ТГ-кривая имеет характер, близкий к линейному с незначительным изменением угла наклона, соответствующим изменению темпа прироста массы, при нагреве до температур 180, 354 и 442 °С. При этом температура, при которой наблюдается максимальное отклонение от ранее зафиксированного угла наклона, совпадает с температурой конца ТЭ. Это говорит об увеличении продолжительности улетучивания и снижении интенсивности диссоциации.

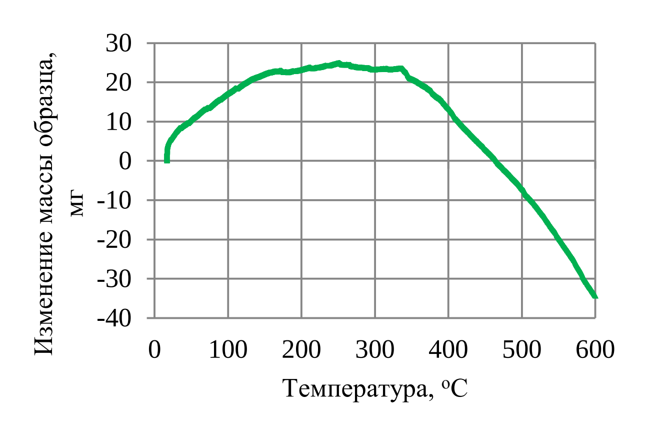


Рис. 6. Термогравиметрическая кривая образца с содержанием 1% Astr

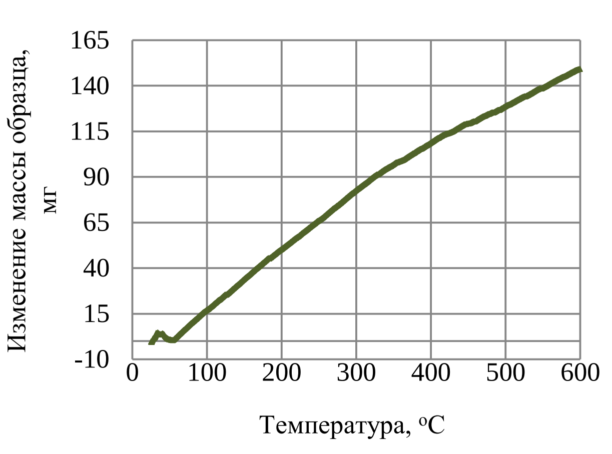


Рис. 7. Термогравиметрическая кривая образца с пластификатором и содержанием 1 % Astr

5. Для образца с содержанием Astr 2 % характерно наличие малых пиков, соответствующих непродолжительным участкам диссоциации с нагревом не более 10–15°С. Начало таких участков наблюдается при температурах 56, 140, 281, 305, 458 и 545°С. Кроме того, нагрев образца не сопровождается окончанием деструкции в связи с тем, что изменение массы носит характер прироста. Данные наблюдения свидетельствуют о том, что термического разложения образца при нагреве до 600 °С не происходит. Большое количество малых пиков говорит о неравномерности выхода летучих компонентов, а непродолжительность их диссоциации — о способности материала к наращиванию теплоизолирующего углистого слоя.

6. Пластифицированный материал, содержащий 2 % Astr, также показывает лишь процесс прироста массы и подтверждает отсутствие ТЭ при нагреве образца до 600 °С. Более того, при нагреве свыше 245 °С возрастание массы принимает линейный характер, то есть становится максимально стабильным.

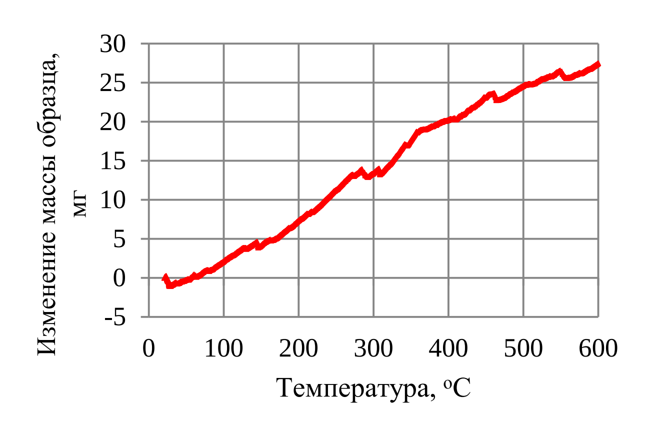


Рис. 8. Термогравиметрическая кривая образца с содержанием 2% Astr

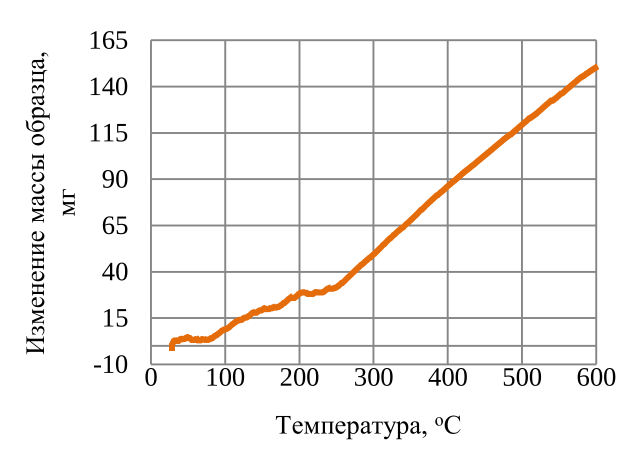


Рис. 9. Термогравиметрическая кривая образца с пластификатором и содержанием 2% Astr

Таким образом, можно наблюдать, что для образцов, в состав которых входит пластифицирующий агент, происходит сглаживание ТГ-кривых, что свидетельствует о стабилизации процесса нагревания. Образцы с содержанием 2 % наночастиц Astr характеризуются отсутствием термического разложения, которому сопутствует потеря массы. Данный факт также связан с наращиванием карбонизированного слоя на поверхности образца. Это позволяет усилить теплоизоляцию материала и ограничить доступ окислителя, что является сопутствующими защитными механизмами при сгорании полимеров. Также стоит отметить, что характер потери массы пластифицированных образцов близок к линейному. Связано это в первую очередь с тем, что пластификатор способствует снижению вероятности образования трещин и сокращению количества дефектов в объеме образца, что также положительно сказывается на устойчивости материала к воздействию высоких температур.

Выводы.

1. Благодаря прочностным характеристикам и армирующим свойствам Astr, позволяющими сшивать структурные дефекты модифицируемого материала, для образцов с содержанием 2 % Astr на ДТГ-кривых отсутствуют пики термического эффекта, то есть при нагреве материала вплоть до 600 °С разрушения кристаллической решетки не наблюдается.

2. При введении в структуру материала модификатора Astr с ярко выраженными антиокислительными свойствами происходит торможение процесса окисления. Увеличение продолжительности окисления способствует формированию карбонизированного слоя, способствующего теплозащите и изоляции.

3. В связи с малыми размерами частицы Astr обладают большой удельной поверхностью, что определяет их высокие сорбционные свойства. Благодаря этому для образцов с содержанием 1 % Astr снижается амплитудное значение термического эффекта, а, следовательно, и интенсивность экзотермических реакций.

4. Добавление Astr в присутствии пластификатора позволяет добиться равномерного, близкого к линейному изменения массы образца, что говорит о стабильном характере процессов нагревания и окисления. Это также способствует устойчивому формированию теплозащитного и изолирующего карбонизированного слоя.

5. Большое количество малых пиков изменения массы на ТГ-кривых образца без пластификатора свидетельствует о неравномерности диссоциации компонентов, что также способствует наращиванию углистого слоя с регулярным его обновлением.

Достигнутые результаты позволяют конкретизировать и дополнить теоретические сведения о поведении модифицированных углеродными наноструктурами эпоксидных материалов в условиях повышенных температур, а также демонстрируют положительное влияние модификации на термические характеристики ПКМ предложенного состава. Синергизм свойств модификаторов приводит к повышению термической стабильности материала по сравнению с базовым полимерным составом. Использование модифицированного материала позволит улучшить показатели термостойкости и прочности композиционных изделий в условиях воздействия повышенных температур при пожаре.

Библиографический список

1. Физико-механическая монолитность структуры и свойства высокопрочных полимерных композиционных материалов / И. Д. Симонов-Емельянов, Н. В. Апексимов, А. Н. Трофимов [и др.] // Конструкции из композиционных материалов. — 2019. — № 2 (154). — С. 30–36.

2. Ворошpåирин, А. С. Полимерные материалы на основе эпоксидных смол / А. С. Ворошилин // Современные технологии в образовании и промышленности: от теории к практике : сб. матер. II Внутривуз. науч.-практ. конф. — Стерлитамак : Изд-во Уфим. гос. нефт. тех. ун-та, 2018. — С. 118–119.

3. Ушков, В. А. Горючесть эпоксидных полимеров / В. А Ушков, Л. С. Григорьева, В. В. Абрамов // Вестник Московского государственного строительного университета. — 2011. — № 1. — С. 352–356.

4. ГОСТ Р 56211–2014 Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2015. — URL : http://docs.cntd.ru/document/1200115430 (дата обращения : 20.10.2020).

5. ТУ 6–02–1099–83 Полиэтиленполиамины дистиллированные : Российское энергетическое агентство. — Москва : Стандартинформ, 1984. — 63 с. — URL : http://nd.gostinfo.ru/document/3308397.aspx (дата обращения : 20.10.2020).

6. Гришанов, А. А. Свойства композитов на основе эпоксидной алифатической смолы ДЭГ-1 / А. А. Гришанов // Клеи. Герметики. Технологии. — 2013. — № 6. — С. 11–14.

7. Полиэдральные многослойные углеродные наночастицы фуллероидного типа : патент 2196731 Рос. Федерация : C01B 31/02 / А. Н. Пономарев, В. А. Никитин. — № 2000124887/12 ; заявл. 2000.09.21 ; опубл. 2003.01.20. — URL : https://yandex.ru/patents/doc/RU2196731C2_20030120 (дата обращения : 20.10.2020).

8. Ивахнюк, Г. К. Тенденции развития производства наномодифицированных полимерных композитов в системах противопожарной защиты транспортных объектов / Г. К. Ивахнюк, В. А. Борисова // Актуальные проблемы и тенденции развития техносферной безопасности в нефтегазовой отрасли : матер. II междунар. науч.-практ. конф. — Уфа : Изд-во Уфим. гос. нефт. тех. ун-та, 2019. — С. 35–38.

9. Углеродные наночастицы структурные модификаторы и упрочнители полимеров и полимерных композитов / С. И. Ильченко, Г. М. Гуняев, В. М. Алексашин [и др.] // Авиационные материалы и технологии. — 2004. — № 2. — С. 36–54.

10. Введение нанопорошков и механические свойства материалов на основе эпоксидных смол / Т. Брусенцева, К. Зобов, А. Филиппов [и др.] // Наноиндустрия. — 2013. — № 3 (41). — С. 21–31.

11. ГОСТ Р 53293–2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. — Москва : Стандартинформ, 2019. — URL : http://docs.cntd.ru/document/1200071912 (дата обращения : 20.10.2020).

12. Шаталова, Т. Б. Методы термического анализа : Методическая разработка / Т. Б Шаталова, О. А. Шляхтин, Е. М. Веряева. — Москва : Изд-во Мос. гос. ун-та им. Ломоносова, 2011. — 72 с. — URL : https://docplayer.ru/29389082-Metody-termicheskogo-analiza.html (дата обращения : 20.10.2020).

13. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения : Справ. изд. в 2 кн. / А. Н. Баратов, А. Я. Корольченко, Г. Н. Кравчук [и др.]. — Москва : Химия, 1990. — 496 с.

14. Мостовой, А. С. Разработка составов, технологии и опредление свойств микро- и нанонаполненных эпоксидных композитов функционального назначения : дис. … канд. техн. наук / А. С. Мостовой. — Саратов, 2014. — 8 с.

15. Горюнов, В. А. Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ термодеструкции полимерных материалов / В. А. Горюнов, А. И. Черников, А. М. Чуйков // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. — 2015. — Т. 1. — С. 154–157.

Сдана в редакцию 18.08.2020
Запланирована в номер 29.09.2020

Об авторах:

Борисова Валерия Анатольевна, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России (196105, РФ, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9240-2274, valery.borisova.01@yandex.ru

Егоров Андрей Александрович, соискатель факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России (196105, РФ, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 149), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2495-3829, andreey-e@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Борисова — формирование основной концепции, целей и задач исследования, научное руководство, проведение расчетов, формирование выводов; А. А. Егоров — анализ результатов исследований, подготовка и доработка текста, корректировка выводов.

Submitted 18.08.2020
Scheduled in the issue 29.09.2020

Authors:

Borisova, Valeriya A., Associate professor, Faculty of Training Highly Qualified Personnel, Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149, Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 196105, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9240-2274, valery.borisova.01@yandex.ru

Egorov, Andrey A., Competitor, Faculty of Training Highly Qualified Personnel, Saint-Petersburg University of State Fire Service of EMERCOM of Russia (149, Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 196105, RF), ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2495-3829, andreey-e@mail.ru

Contribution of the authors:

V. A. Borisova — formulation of the basic concepts, goals and objectives of the study, scientific supervision, calculations, formulation of conclusions; A. A. Egorov — analysis of research results, preparation and finalization of the text, correction of conclusions.